

О Т З Ы В

официального оппонента, кандидата технических наук, доцента Каплуна Дмитрия Ильича на диссертацию Моргунова Владимира Викторовича на тему: «Система управления процессом спекания шихты в трубчатых вращающихся печах на основе прогнозной модели и экспертной базы правил», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

1. Актуальность темы диссертации

Несмотря на развитие средств автоматизации, управление трубчатыми вращающимися печами для спекания нефелинового концентрата с известняком во многом остается сложной задачей. Причина заключается в том, что такие агрегаты характеризуются высокой инерционностью, распределенностью параметров по длине печи, взаимным влиянием технологических зон и наличием возмущающих факторов, которые не всегда могут быть оперативно измерены.

На практике это приводит к тому, что локальные системы автоматического регулирования обеспечивают стабилизацию отдельных параметров, но не позволяют в полной мере учитывать состояние печи как единого объекта управления. При изменении расхода топлива, подачи шихты, режима тяги или расхода возвращаемой пыли изменяется не только целевой параметр конкретной зоны, но и температурный, газодинамический и материальный режим других участков агрегата. Поэтому эффективность управления существенно зависит от квалификации оператора и его способности оценивать последствия принимаемых решений.

Спекание является одной из наиболее затратных операций в технологии переработки нефелинового концентрата. Для России, обладающей значительными запасами высококремнистого алюмосиликатного сырья при ограниченных запасах качественных бокситов, повышение эффективности переработки нефелинов является актуальной задачей. Стабильная работа печи непосредственно влияет на степень извлечения глинозема, расход топлива, качество спека, состояние футеровки и образование обмазки.

В связи с этим актуальной задачей является разработка системы усовершенствованного управления процессом спекания, в которой выбор управляющих воздействий осуществляется на основе комплексной прогнозной модели и экспертной базы правил. Такой подход позволяет снизить зависимость управления от субъективного опыта оператора за счет использования расчетной оценки состояния агрегата и формирования рекомендаций с учетом взаимосвязи процессов, протекающих в трубчатой вращающейся печи.

ОТЗЫВ
ВХ. № 9-186 от 17.06.26
АУ УС

2. Научная новизна диссертации

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что автором предложены новые модельные и алгоритмические решения для управления процессом спекания нефелинового концентрата с известняком, в которых трубчатая вращающаяся печь рассматривается как объект с изменяющейся внутренней геометрией рабочего пространства. Такой подход позволяет учитывать влияние обмазки и колец на параметры движения материала и использовать полученные расчетные данные при формировании управляющих воздействий.

К числу результатов, обладающих научной новизной, следует отнести установление зависимости высоты слоя и среднего времени пребывания сыпучего материала от изменения внутренней формы рабочего пространства трубчатой вращающейся печи по длине агрегата.

Новым результатом является предложенная структура комплексной прогнозной модели процесса спекания нефелинового концентрата с известняком. Модель объединяет расчет осевого движения материала, уноса и возврата пыли, горения факела, теплообмена в цепной зоне, химических превращений и теплообмена в зонах без внутренних теплообменных устройств.

Кроме того, в работе предложена структура системы управления процессом спекания, основанная на совместном использовании комплексной прогнозной модели и экспертной базы правил. Новизна данного решения состоит в том, что выбор управляющих воздействий осуществляется с учетом расчетной оценки состояния печи, состояния отдельных технологических зон и их взаимного влияния, а значение управляющего воздействия определяется на основе расчета математической модели процесса.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертационной работе, обеспечивается последовательным построением исследования: от анализа технологических особенностей процесса спекания и существующих систем управления трубчатыми вращающимися печами к разработке математических моделей, экспериментальной проверке отдельных зависимостей и формированию структуры системы усовершенствованного управления.

Достоверность результатов, связанных с описанием осевого движения сыпучего материала, подтверждается проведением экспериментальных исследований на разработанной физической модели вращающегося агрегата. Использование данной модели позволило воспроизвести различные варианты изменения внутренней формы рабочего пространства, возникающие при образовании обмазки и колец, и оценить их влияние на высоту слоя материала и среднее время пребывания материала в печи. Полученные экспериментальные данные использованы для проверки математической модели, что повышает обоснованность предложенного подхода.

Достоверность полученных результатов также обеспечивается применением комплекса взаимодополняющих методов исследования. В работе использованы анализ научно-технической

литературы и патентных материалов, физическое моделирование, лабораторные эксперименты, математическое моделирование, программная реализация расчетных алгоритмов, а также методы нечеткой логики для формирования экспертной базы правил. Совокупное применение данных методов соответствует характеру поставленных задач и позволяет считать полученные результаты достаточно обоснованными.

Обоснованность экспертной базы правил определяется тем, что она сформирована с учетом технологических знаний, анализа литературных источников и результатов моделирования. Использование экспертной базы правил совместно с комплексной прогнозной моделью позволяет формализовать процесс выбора управляющих воздействий и учитывать состояние отдельных зон печи.

Выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, логически вытекают из поставленных задач, результатов экспериментальных исследований, математического моделирования и оценки эффективности предложенной системы управления. Практическая достоверность результатов дополнительно подтверждается программной реализацией разработанных моделей и использованием результатов исследования в деятельности профильной организации.

4. Научные результаты, их ценность

Научные результаты диссертационной работы представляют ценность для развития методов математического моделирования и управления процессами, протекающими в трубчатых вращающихся печах.

Существенным научным результатом является разработка математического описания осевого движения сыпучего материала с учетом изменения внутренней формы рабочего пространства печи. Данный результат имеет ценность, поскольку образование обмазки и колец в реальных условиях эксплуатации влияет на газодинамический и тепловой режим агрегата, а также на перемещение материала по длине печи.

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus; получено 2 патента на изобретение и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии подходов к математическому описанию процессов, протекающих в трубчатых вращающихся печах при спекании нефелинового концентрата с известняком. Полученные результаты позволяют уточнить представления о движении сыпучего материала в агрегате с изменяющейся внутренней формой рабочего пространства и учитывать влияние обмазки и колец на высоту слоя материала

и среднее время его пребывания в печи.

Разработанная математическая модель осевого движения материала может использоваться как составная часть комплексной прогнозной модели трубчатой вращающейся печи. Это расширяет возможности расчета трудноизмеряемых параметров процесса и создает основу для более обоснованного анализа состояния агрегата при разработке систем управления.

Практическая значимость работы определяется созданием технических, экспериментальных и программных решений, которые могут быть использованы при моделировании и управлении процессом спекания. В частности, автором разработано устройство для автоматического определения динамического угла откоса сыпучего материала во вращающемся цилиндре, защищенное патентами на изобретения № 2849726 и № 2849725.

Также разработана и реализована физическая модель вращающегося агрегата, позволяющая определять параметры осевого движения сыпучего материала в объекте с изменяющейся внутренней формой рабочего пространства. Данная модель имеет практическую ценность для экспериментального исследования влияния внутренних геометрических изменений на движение материала.

Кроме того, разработана комплексная прогнозная модель процесса спекания нефелинового концентрата с известняком в ТВП в качестве программного модуля системы управления. Модель обеспечивает расчет осевого движения материала, уноса и возврата пыли, процессов теплообмена во всех технологических зонах печи, горения факела, химических превращений, а также учитывает наличие цепной завесы и форму внутреннего рабочего пространства агрегата. Разработанные программные решения защищены свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2024662839 и № 2024662736.

Практическая значимость результатов подтверждается их внедрением в АО «Моделирование и цифровые двойники» для моделирования движения материала в трубчатых вращающихся печах, а также для оптимизации параметров процесса спекания, что подтверждается актом о внедрении от 01.04.2026.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать при разработке и модернизации программных модулей систем управления трубчатыми вращающимися печами, а также при создании расчетных инструментов для анализа состояния сложных теплотехнологических агрегатов. Практический интерес представляют разработанная модель движения сыпучего материала, учитывающая изменение внутренней формы рабочего пространства, комплексная прогнозная модель процесса спекания и предложенная структура системы управления на основе экспертной базы правил.

Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования в научных, проектных и инжиниринговых организациях, занимающихся промышленной автоматизацией, математическим моделированием, цифровыми двойниками, металлургическим инжинирингом и разработкой программных решений для АСУ ТП. К таким организациям могут быть отнесены

ООО «Промышленная Автоматизация», ООО «Центр цифровых технологий», ООО «Индустрия 4.1», ООО «Сумма технологий», а также другие профильные организации, выполняющие работы в области цифровизации, моделирования и автоматизации промышленных технологических процессов.

Дальнейшее развитие результатов работы целесообразно осуществлять в направлении адаптации разработанной модели к различным типам трубчатых вращающихся печей, расширения экспертной базы правил, интеграции расчетных модулей с промышленными SCADA- и АСУ ТП-системами, а также последующего усовершенствования модели с целью перехода от поддержки принятия решений оператором к реализации непрерывного управления процессом спекания с автоматизированным формированием управляющих воздействий.

7. Замечания и вопросы по работе

1. Какие параметры целесообразно выводить оператору вместе с рекомендуемым управляющим воздействием?

2. Может ли предложенная модель использоваться для сравнения различных режимов работы печи до их внедрения на промышленном объекте?

3. В главе 2 рассматривается холодная физическая модель. Какие факторы реальной высокотемпературной печи не могут быть воспроизведены на данной установке?

4. Если профиль обмазки изменяется во времени, каким образом должна обновляться комплексная прогнозная модель для сохранения точности расчетов?

5. В главе 4 система функционирует в режиме ассистента оператора. При этом вопросы контроля выполнения оператором выданных рекомендаций и оценки их фактической эффективности раскрыты ограниченно.

6. В главе 4 оценка эффективности системы управления показана через стабилизацию процесса и повышение степени извлечения глинозема. Однако, не рассмотрено влияние предлагаемой системы на расход топлива, ресурс футеровки и устойчивость обмазки.

Отмеченные замечания не снижают общей позитивной оценки диссертации, научной и практической значимости полученных результатов.

8. Заключение по диссертации

Диссертация «Система управления процессом спекания шихты в трубчатых вращающихся печах на основе прогнозных модели и экспертной базы правил», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-

Петербургского горного университета Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор **Моргунов Владимир Викторович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Официальный оппонент

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматики и процессов управления Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»



Каплун Дмитрий Ильич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

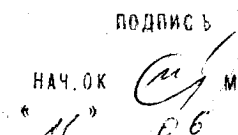
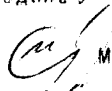
Адрес: ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф., Санкт-Петербург, 197022

Телефон: +7 812 234-46-51

E-mail: info@etu.ru

Подпись кандидата технических наук, доцента кафедры автоматики и процессов управления Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» Каплуна Дмитрия Ильича заверяю.

«11» 06 2024 г.

М.П.  ЗАВЕРЯЮ:
НАЧ. ОК  М.В. СОКОЛОВА
"11" 06 2026